

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ В ЗАДАЧЕ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРЕДПРИЯТИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**А.И. Степанова**, *a.i.stepanova@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-3484-2295>

**А.И. Хальясмаа**, *a.i.khaliasmaa@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-5327-6076>

**П.В. Матренин**, *p.v.matrenin@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>

Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

**Аннотация.** Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности относятся к объектам критической инфраструктуры. Одно из требований к электротехническому комплексу заключается в соответствии требованиям по обеспечению энергосбережения и энергетической эффективности. Ввиду сложности учета технологических процессов на предприятиях нефтегазовой промышленности в основном применяются технические меры, требующие значительных капиталовложений. В данной статье рассматривается возможность внедрения организационной меры, которая заключается в прогнозировании электропотребления предприятия нефтегазовой промышленности. Для демонстрации проблемы прогнозирования, которая заключается в высокой доле аperiodических составляющих графика потребления и его высокой дисперсии, в статье представлен пример на реальных данных. Для решения указанной проблемы в статье анализируется возможность применения мультиагентных систем при реализации организационной меры по повышению энергетической эффективности за счет краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии предприятиями. В статье предложена мультиагентная система, включающая агентов-потребителей (с учетом потребителей-регуляторов), агентов-генераторов и агентов-накопителей. При построении слабосвязанной сети агенты стремятся к решению не только собственной, но и общей целевой функции системы, которая состоит в обеспечении баланса мощности и уменьшении расходов на электрическую энергию. Показано, что возможно снизить расходы предприятия за счет прогнозирования потребления агентами-потребителями, нахождения оптимального графика собственной генерации, накопления электрической энергии и включенности потребителей-регуляторов. В рамках данного исследования для каждого агента определены целевая функция, входные и выходные потоки данных.

**Ключевые слова:** краткосрочное прогнозирование потребления электрической энергии, нефтегазовая промышленность, мультиагентная система

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEUZ-2022-0030 Разработка интеллектуальной мультиагентной системы для моделирования глубоко интегрированных технологических систем в электроэнергетике).

**Для цитирования:** Степанова А.И., Хальясмаа А.И., Матренин П.В. Анализ возможности применения мультиагентных систем в задаче краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии электро-технического комплекса предприятия нефтегазовой промышленности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2024. Т. 24, № 2. С. 47–57. DOI: 10.14529/power240205

## THE USE OF MULTI-AGENT SYSTEMS FOR THE SHORT-TERM FORECASTING OF POWER CONSUMPTION OF OIL AND GAS INDUSTRY ENTERPRISES

**A.I. Stepanova**, *a.i.stepanova@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-3484-2295>

**A.I. Khalyasmaa**, *a.i.khalyasmaa@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-5327-6076>

**P.V. Matrenin**, *p.v.matrenin@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia*

**Abstract.** The electrotechnical complexes of the oil and gas industry are considered critical infrastructure, which requires compliance with energy saving and energy efficiency regulations. Due to the complexity of technical processes, oil and gas industry enterprises implement only technical measures requiring capital investment. The possibility of implementing an organizational measure which consists of forecasting power consumption of oil and gas industry enterprises is considered in this article. The article presents an example demonstrating the problems of forecasting such power consumption, namely the low frequency of the load curve and its high dispersion. In order to solve these problems, the possibility of using multi-agent systems to increase energy efficiency through short-term forecasting of power consumption by enterprises of the oil and gas industry is considered. The consumer agents (considering regulatory consumers), generation agents, and storage agents for building multi-agent systems are proposed. These agents address not only their own but also the overall target function of the system, to ensure a power balance and reduce the cost of power consumption. The possibility of reducing the expenses of the enterprise by forecasting the power consumption by consumer agents, finding the optimal schedule for the generation and accumulation of energy, and the inclusion of consumer-regulators is considered. The target function and input and output data were defined for each agent.

**Keywords:** short-term forecasting of power consumption, gas industry, multi-agent systems

**Acknowledgments.** The research was carried out within the state assignment with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject No. FEUZ-2022-0030 Development of an intelligent multi-agent system for modeling deeply integrated technological systems in the power industry).

**For citation:** Stepanova A.I., Khalyasmaa A.I., Matrenin P.V. The use of multi-agent systems for the short-term forecasting of power consumption of oil and gas industry enterprises. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2024;24(2):47–57. (In Russ.) DOI: 10.14529/power240205

### Введение

*А. Энергоэффективность предприятий нефтегазовой промышленности*

Для стимулирования развития промышленности был разработан Федеральный закон (ФЗ) от 23 ноября 2009 г. № 261 [1], который описывает основные положения об энергосбережении и повышении энергетической эффективности. Нефтегазовая промышленность является одной из важнейших отраслей экономики Российской Федерации [2]. В соответствии с ФЗ № 261 предприятия нефтегазовой промышленности проводят мероприятия по повышению энергетической эффективности за счет реализации мер энергосбережения. В [3] представлены основные положения в области повышения энергоэффективности и энергоснабжения компании ПАО «НК «Роснефть». Компания ПАО «Газпром» на каждые три года составляет программу повышения энергоэффективности [4] в соответствии с положениями о создании системы управления энергоэффективностью [5]. Для достижения целей программ предприятия нефтегазовой промышленности применяют меры энергосбережения, которые включают [3, 5]:

- эффективное управление технологическими процессами;
  - применение инновационных технологий и оборудования;
  - рациональное использование и экономию энергетических ресурсов при осуществлении производственной деятельности;
  - снижение уровня воздействия на окружающую среду.
- Данные меры состоят в реализации проектов [5]:
- по внедрению энергоэффективного оборудования, модернизации оборудования или замене их частей;
  - внедрению возобновляемых и вторичных энергетических ресурсов;
  - использованию альтернативного моторного топлива;
  - использованию попутного нефтяного газа.
- Можно заключить, что в настоящее время меры энергосбережения в основном направлены на проведение технических мероприятий, требующих капиталовложений в оборудование. В данной статье

анализируется возможность применения мультиагентных систем для реализации организационной меры по повышению энергетической эффективности за счет краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии предприятиями.

*Б. Краткосрочное прогнозирование потребления электрической энергии*

Работа системы электроснабжения предприятия нефтегазовой промышленности зависит от плана добычи полезных ископаемых и других технологических факторов [6]. Тарифы оптового рынка электрической энергии и мощности (ОРЭМ) стимулируют внепиковое потребление и повышение точности прогнозирования потребления предприятий [7, 8]. Регулирование нагрузки позволяет оптимизировать график электропотребления предприятия и снизить расходы на электроэнергию. На предприятиях нефтегазовой промышленности объекты потребления могут быть классифицированы на объекты добычи полезных ископаемых, объекты технологического процесса (например, объекты сбора и сепарации нефти и газа), объекты потребители-регуляторы (например, водооткачивающие насосы) [9].

Существующие исследования в основном посвящены краткосрочному прогнозированию потребления электрической энергии электроэнергетических систем. В статье [10] рассматривается прогнозирование электропотребления гарантирующего поставщика с учетом календарных данных, ретроспективы фактического потребления, признаков наличия водоснабжения, метеоданных. В статье [11] предлагается подход к краткосрочному прогнозированию с учетом экономических индексов. Ввиду возможности учета большого количества факторов, высокой доли периодической составляющей и взаимной компенсации аperiodических составляющих процессов потребления электроэнергетических систем средняя точность прогнозов составляет 98–99 % [12, 13].

Прогнозирование потребления электрической энергии промышленного предприятия имеет более стохастический характер, а точность прогноза может составлять 60 % [14]. В статье [15] анализируется влияние температуры, номера дня и ретроспективы потребления на прогноз потребления электроэнергии коммерческим предприятием, однако используются данные лишь за один год. Учёт технологических факторов производственных предприятий в существующих исследованиях не рассматривается. Исключением является статья [16], но в ней рассматриваются предприятия не нефтегазовой промышленности, а из производственных факторов учитываются только ремонты.

В данной статье приведены результаты статистического анализа почасового графика электропотребления реального предприятия за три года, обосновывающие сложность задачи его прогнозирования. Также в работе предложена новая математическая модель мультиагентной системы для задачи краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности с учетом объектов потребления, генерации и накопления. Такой подход позволит за счет декомпозиции графика электропотребления повысить точность его прогнозирования, а также управлять нагрузкой для снижения электропотребления в часы с наибольшими ставками тарифов на электроэнергию и мощность.

**Проблемы краткосрочного прогнозирования электрической энергии предприятий нефтегазовой промышленности**

Для трёхлетней ретроспективы почасовых значений потребления электрической энергии линейного производственного управления магистрального газопровода, реального предприятия нефтегазовой промышленности, был проведен анализ распределения потребления по сезонам. Распределение представлено на рис. 1. В таблице представлены статистические характеристики потребления электроэнергии данного предприятия для каждого сезона. Анализ графика распределения почасовых значений электропотребления для всего рассматриваемого промежутка показывает большое значение стандартного отклонения в 541,3 кВт·ч по сравнению со средним значением в 675,8 кВт·ч. Разница между максимальным потреблением в зимний период (2837 кВт·ч) и минимальным в летний (99 кВт·ч) составляет 2738 кВт·ч. Анализ статистических характеристик распределения показывает, что для кратковременного прогнозирования электропотребления предприятия необходимо учитывать фактор сезонности.

Полученное в статье распределение потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности для осеннего сезона, представленное на рис. 2, показывает неоднородность сезонного распределения в разные годы. Таким образом, можно заключить, что:

- необходимо учитывать технологические факторы;
- для анализа влияния технологических факторов на прогноз потребления необходимо рассматривать ретроспективу потребления предприятием за период больше одного года.

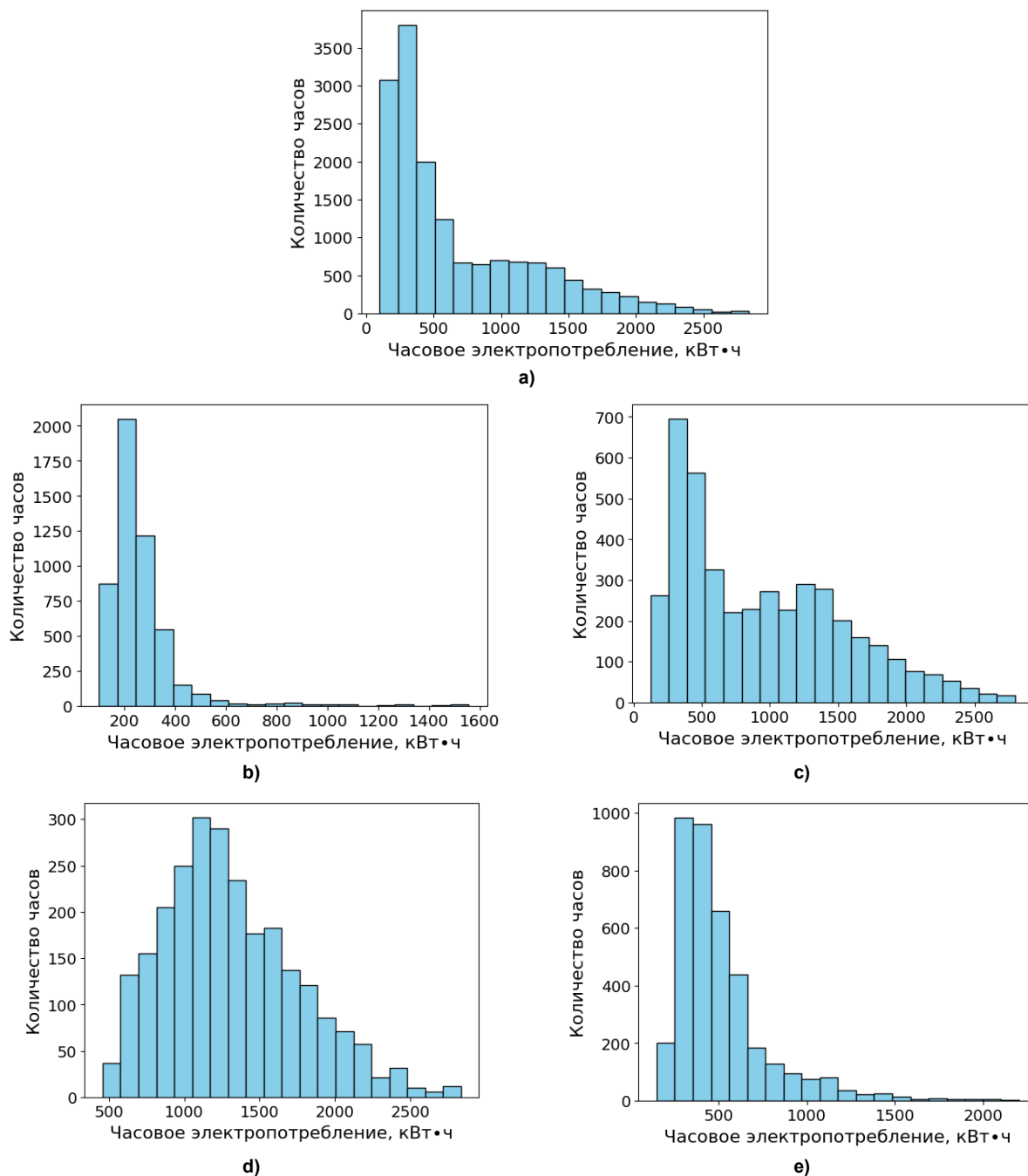


Рис. 1. Распределение часовых значений электропотребления предприятием: а – за весь рассматриваемый промежуток; б – лето; с – осень; д – зима; е – весна  
Fig. 1. The distribution of the power consumption of gas industry enterprises: а – for a two-year period; б – summer; с – autumn; д – winter; е – spring

Статистические характеристики сезонного потребления электрической энергии  
предприятием нефтегазовой промышленности  
Statistical characteristics of seasonal power consumption of a gas industry enterprise

| Сезон       | Среднее значение, кВт·ч | Стандартное отклонение, кВт·ч | Минимальное значение, кВт·ч | Максимальное значение, кВт·ч |
|-------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Вся выборка | 675,8                   | 541,3                         | 99,4                        | 2837,0                       |
| Лето        | 263,9                   | 147,5                         | 99,4                        | 1556,0                       |
| Осень       | 958,7                   | 589,4                         | 125,3                       | 2797,2                       |
| Зима        | 1293,8                  | 453,0                         | 363,2                       | 2837,0                       |
| Весна       | 479,4                   | 225,3                         | 149,1                       | 2017,8                       |

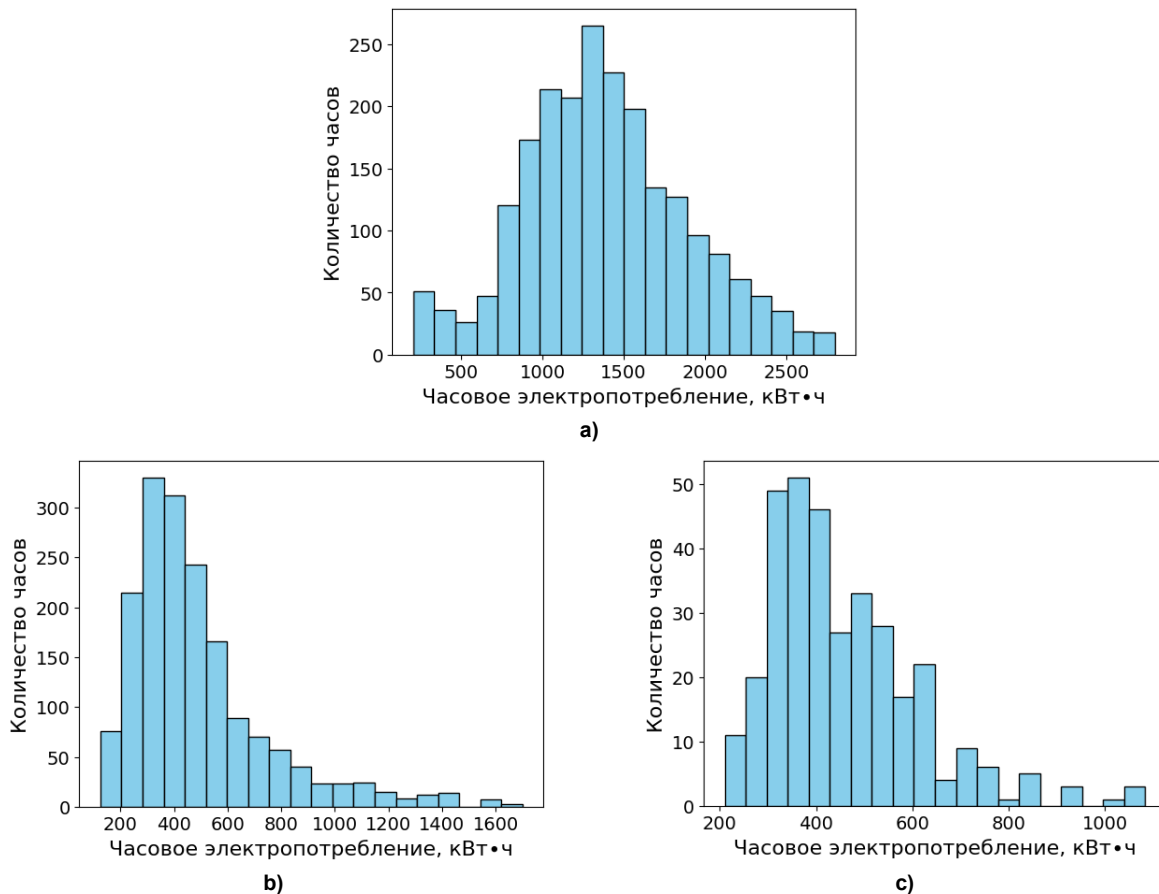


Рис. 2. Распределение потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности в осенний сезон: а – 2013 г.; б – 2014 г.; в – 2015 г.

Fig.2. The distribution of power consumption of a gas industry enterprise in autumn: а – 2013; б – 2014; в – 2015

### Применение мультиагентных систем в задаче краткосрочного прогнозирования потребления электротехнического комплекса предприятия нефтегазовой промышленности

Применение мультиагентных систем (МАС) позволяет исследовать поведение реального объекта за счет построения слабосвязанных автономных объектов, которые взаимодействуют друг с другом для достижения поставленных целей. Под агентом понимается объект, который получает данные от окружающей среды и воздействует на неё [17].

В настоящее время МАС применяются для различных задач оптимизации работы электротехнических комплексов и систем. В статьях [18, 19] МАС применяются для выбора стратегии управления режимами работы микросетей с учетом накопителей энергии. В статье [20] МАС используется для решения задачи управления потреблением электрической энергии в микросети, в которой присутствуют фотоэлектрические станции, при этом вводится агент-генератор, целевая функция которого выражается в уменьшении расходов на покупку электрической энергии в зависимости от прогнозируемой выработки. В статье [21] МАС применяются для решения задачи управления

энергетической системой с объектами генерации на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). В статье [22] представлено применение МАС для обработки разнородной информации в микросетях.

Применение МАС для предприятий нефтегазовой промышленности было предложено в статьях [23, 24]. Их авторы описывают использование агентов-генераторов, агентов системы электропитания и агентов-потребителей для обеспечения надежного функционирования электротехнического комплекса предприятия за счет оптимизации электрических режимов, топологии сети и обеспечения баланса мощности. Предложенный подход позволяет проанализировать режимы функционирования системы, однако агенты представлены объектами в терминах объектно-ориентированного, а не в терминах мультиагентных систем. У агентов не сформулированы собственные цели, не представлено описание с точки зрения их поведения и взаимодействия с другими агентами и внешними объектами согласно принципам описания МАС, представленным в монографии [25].

В данной статье предложена новая модель МАС для электротехнического комплекса нефтегазового предприятия. Каждый агент может быть представлен как кортеж:

$$\langle I_t, O_t, S_t, R_t, A_t \rangle, \quad (1)$$

где  $t$  – момент времени;  $I_t$  – входные данные агента (значение потока данных в момент  $t$ );  $O_t$  – выходные данные;  $S_t$  – состояние объекта (память);  $R_t$  – правила поведения агента;  $A_t$  – список действий агента.

При этом указанные элементы кортежа связаны следующими отношениями:

$$O_{t+1} = f_o(I_t, S_{t+1}, A_{t+1}); \quad (2)$$

$$S_{t+1} = f_s(I_t, S_t, A_{t+1}); \quad (3)$$

$$A_{t+1} = f_a(I_t, R_t, S_t). \quad (4)$$

МАС в данной работе рассматривается как информационная система, функции которой определяются совокупностью действий агентов, направленных на достижение цели [26]. В задачах управления электротехническими комплексами на данный момент интеллектуальные информационные системы допустимо использовать только в режиме поддержки принятия решений из-за их недетерминированной природы [27]. Поэтому агенты МАС в данной работе описываются кортежем, не включающим в себя действия  $A_t$ :

$$\langle I_t, O_t, S_t, R_t \rangle. \quad (5)$$

#### **Описание агентов мультиагентной системы краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности**

Электротехнический комплекс предприятия нефтегазовой промышленности включает в себя потребителей электроэнергии, собственную генерацию и системы накопления энергии. Как было рассмотрено ранее, потребители могут быть разделены на объекты основного технологического процесса и потребители-регуляторы. Каждый объект может быть представлен агентом, который описывается кортежем в соответствии с выражением (5).

Для определения входных и выходных потоков данных агента, его состояний и поведения необходимо [26]:

- определить цели всей системы и каждого агента (целевые функции), источники и получателей данных;
- определить объекты системы и связи между ними.

Для определения целевых функций необходимо сформулировать приведенные ниже соотношения. Баланс мощности предприятия можно записать в следующем виде:

$$P_{\text{вн}} + P_{\text{сг}} + P_{\text{н+}} = P_{\text{п}} + P_{\text{н-}} + \Delta P, \quad (6)$$

где  $P_{\text{вн}}$  – мощность, потребляемая извне;  $P_{\text{сг}}$  – мощность, потребляемая от собственной генерации;  $P_{\text{н+}}$  – мощность, выдаваемая накопителем в систему электроснабжения;  $P_{\text{п}}$  – мощность объектов потребления;  $P_{\text{н-}}$  – мощность, потребляемая накопителем во время зарядки;  $\Delta P$  – потери.

Расходы предприятия на электроэнергию определяются как

$$S = P_{\text{вн}} \cdot T + f(P_{\text{сг}}) \cdot k_{\text{ген}} + P_{\text{н+}} \cdot k_{\text{накоп}}, \quad (7)$$

где  $S$  – расходы;  $T$  – тариф на электрическую энергию;  $f(P_{\text{сг}})$  – функция зависимости количества потребленного топлива в зависимости от выработки собственной генерации;  $k_{\text{ген}}$  – коэффициент, учитывающий стоимость использования собственной генерации;  $k_{\text{накоп}}$  – коэффициент, учитывающий стоимость использования накопителя.

Целевая функция МАС включает в себя:

- обеспечение баланса мощности в соответствии с выражением (6);
- уменьшение расходов на электроэнергию в соответствии с выражением (7).

В соответствии с целевыми функциями определяются входные и выходные потоки данных агента.

Целевой функцией агента-потребителя является:

- уменьшение расходов на электроэнергию;
- управление нагрузкой (изменение графика включения потребителей-регуляторов, накопителей).

Агент-потребитель формирует краткосрочный прогноз потребления электрической энергии предприятием на основании ретроспективы потребления, производственного плана, метеопараметров и данных об оборудовании. Также в виде входного параметра для возможности учета не формализуемых правил и опыта специалиста по планированию электропотребления в качестве входного параметра вводится значение экспертных поправок. С целью управления нагрузкой на основании тарифа для потребителей-регуляторов формируется график включения во внепиковые часы работы сети. Входные и выходные данные для агента-потребителя описываются выражениями (8) и (9) соответственно:

$$I_t = f(\text{Power}, T, \text{Plan}, \text{Exp}, \text{Meteo}, \text{Eq}, \text{reg}), \quad (8)$$

где  $\text{Power}$  – ретроспективное фактическое потребление;  $T$  – прогнозное значение тарифа на электрическую энергию;  $\text{Plan}$  – производственный план;  $\text{Exp}$  – экспертные поправки в прогноз потребления;  $\text{Meteo}$  – метеопараметры;  $\text{Eq}$  – данные об оборудовании (рабочее/нерабочее состояние);  $\text{reg}$  – индикатор потребителя-регулятора;

$$O_t = f(\text{Act}_{\text{потр}}, \text{Forecast}), \quad (9)$$

где  $\text{Act}_{\text{потр}}$  – график включения потребителей-регуляторов;  $\text{Forecast}$  – прогноз потребления.

Целевой функцией агента-генератора является:

- уменьшение расходов на электроэнергию;
- покрытие дефицита мощности;
- обеспечение баланса мощности.

Агент-генератор формирует график включения собственной генерации на основании прогнозного значения тарифа на электрическую энергию, производственного плана, коэффициента, учитывающего стоимость использования собственной

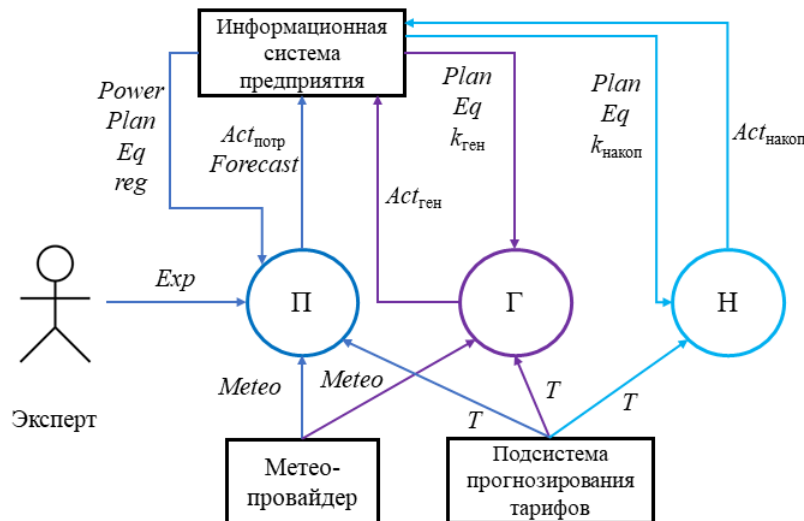


Рис. 3. Взаимодействие агентов: П – агент-потребитель, Г – агент-генератор, Н – агент-накопитель  
Fig. 3. Agent-to-agent interaction: П – consumer, Г – generator, Н – storage

генерации, данных о генерирующем оборудовании и метеопараметрах (в случае использования ВИЭ). Входные и выходные потоки данных для агента-генератора описываются выражениями (10) и (11) соответственно:

$$I_t = f(T, Plan, k_{ген}, Eq, Meteo); \quad (10)$$

$$O_t = f(Act_{ген}), \quad (11)$$

где  $Act_{ген}$  – график включения генераторов.

Целевой функцией агента-накопителя является:

- уменьшение расходов на электроэнергию;
- покрытие дефицита мощности;
- поддержание максимального уровня заряда накопителя энергии.

Агент-накопитель формирует график накопления и использования электроэнергии на основании прогнозного значения тарифа на электрическую энергию, плана добычи, коэффициента, учитывающего стоимость использования накопителя и данных об оборудовании накопителя. Входные и выходные потоки данных для агента-накопителя описываются выражениями (12) и (13) соответственно:

$$I_t = f(T, Plan, k_{накоп}, Eq); \quad (12)$$

$$O_t = f(Act_{накоп}), \quad (13)$$

где  $Act_{накоп}$  – график накопления и использования электроэнергии.

Взаимодействие агентов происходит косвенно, через обмен данными посредством информационной системы предприятия, как показано на рис. 3.

Агенты вычисляют выходные данные  $O_t$  относительно своей и общей целевой функции МАС на основании данных  $I_t$ . График прогноза потребления формируется агентом-потребителем. На основании прогнозного значения тарифа на электрическую энергию формируется график включения потребителей-регуляторов для выравнивания нагрузки. Для обеспечения баланса формируется

график включения генераторов на основании прогнозного значения тарифа на электрическую энергию, коэффициентов, учитывающих стоимость использования собственной генерации и накопителя, экономических ограничений.

#### Заключение

Повышение энергетической эффективности электротехнических комплексов предприятий нефтегазовой промышленности без существенных капитальных вложений возможно с помощью краткосрочного прогнозирования их электропотребления и предиктивного регулирования нагрузки.

Установлено, что проблемой прогнозирования потребления электроэнергии предприятиями нефтегазовой промышленности является высокая доля аperiodических процессов и дисперсия электропотребления, что приводит к необходимости учета технологических факторов.

Показано, что реализация прогнозирования электропотребления на основе анализа технологических процессов предприятия, а также оптимизация его нагрузки возможны на основе предложенной математической модели мультиагентной системы.

В рамках модели предложено выделять три типа агентов: агент-потребитель, агент-генератор и агент-накопитель.

Для каждого из агентов определены целевые функции, входные и выходные потоки данных. Сформулированы принципы работы агентов и обоснована применимость предложенной модели для повышения точности краткосрочного прогнозирования электропотребления предприятия и регулирования его нагрузки. В дальнейших исследованиях планируется применить предложенную модель при разработке мультиагентной информационной системы для предприятий нефтегазовой промышленности.

**Список литературы**

1. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями).
2. Айжанова Г.О. Современное состояние и перспективы развития нефтегазовой отрасли России // Наука и общество: проблемы современных исследований: XIII Междунар. науч.-практ. конф. 2019. Ч. 3. С. 52–58.
3. Политика компании в области повышения энергоэффективности и энергосбережения № П2-04.02 П-01. Роснефть. (с изменениями, утвержденными решением Правления ПАО «НК «Роснефть»» (протокол заседания от 30.06.2017 № Пр-ИС-22п), введенными в действие приказом ПАО «НК «Роснефть» от 28.08.2017 № 489). М.: НК «Роснефть», 2014. 17 с.
4. Программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности ООО «Газпром добыча Иркутск» на 2023–2025 гг. URL: <https://irkutsk-dobycha.gazprom.ru/d/textpage/61/97/programma-eheh-2023-2025.pdf> (дата обращения: 12.02.2024).
5. Газпром. Энергосбережение и энергоэффективность. URL: <https://www.gazprom.ru/sustainability/environmental-protection/energy-conservation/> (дата обращения: 12.02.2024).
6. Матренин П.В., Арестова А.Ю., Антоненко Д.В. Среднесрочное прогнозирование почасовых тарифов на электроэнергию с помощью ансамблевых методов // Проблемы региональной энергетики. 2022. № 2 (54). С. 26–36.
7. Lee E., Kim J., Jang D. Load Profile Segmentation for Effective Residential Demand Response Program: Method and Evidence from Korean Pilot Study // *Energies*. 2020. Vol. 13, iss. 6. P. 1348. DOI: 10.3390/en13061348
8. Канпелько Р.А. Российская и зарубежная практика взаимодействия корпоративных и властных структур оптового рынка электроэнергии и мощности // *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2019. № 2. С. 47–51.
9. Об оценке электропотребления погружного электрооборудования на физической модели / А.В. Ляхомский, А.Б. Петроченков, Е.Н. Перфильева и др. // *Промышленная энергетика*. 2020. № 8. С. 26–33. DOI: 10.34831/EP.2020.18.90.004
10. Серебряков Н.А. Выбор оптимальной архитектуры и конфигурации нейросети в задачах краткосрочного прогнозирования электропотребления гарантирующего поставщика электроэнергии // *Вести высших учебных заведений Черноземья*. 2021. Т. 17, № 2 (64). С. 26–42.
11. A Short-Term Forecasting Approach for Regional Electricity Power Consumption by Considering Its Co-movement with Economic Indices / K. Li, Z. Yang, D. Li et al. // 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2020. P. 551–555. DOI: 10.1109/ITOEC49072.2020.9141928
12. Forecasting planned electricity consumption for the united power system using machine learning / R.V. Klyuev, A.D. Morgoeva, O.A. Gavrin et al. // *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 261. P. 392–402.
13. Short-Term Electricity Consumption Forecast in Siberia IPS Using Climate Aspects / A.G. Rusina, T.A. Filippova, A.E. Kalinin, N.S. Terlyga // 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Erlagol, Russia, 2018. P. 6403–6407. DOI: 10.1109/EDM.2018.8435002
14. Industrial Power Consumption Forecasting Methods Comparison / L. Babich, D. Svalov, A. Smirnov, M. Babich // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). Yekaterinburg, Russia, 2019. P. 307–309. DOI: 10.1109/USBREIT.2019.8736640
15. Блохин А.В., Грицай А.С., Горшенин А.Ю. Исследование факторов, влияющих на потребление электроэнергии коммерческим предприятием // *Математические структуры и моделирование*. 2022. № 3 (63). С. 39–47. DOI: 10.24147/2222-8772.2022.3.39-47
16. Sergeev N., Matrenin P. Improving Accuracy of Machine Learning Based Short-Term Load Forecasting Models with Correlation Analysis and Feature Engineering // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). Novosibirsk, Russian Federation, 2023. P. 1000–1004. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225058
17. Balaji P.G., Srinivasan D. An Introduction to Multi-Agent Systems // *Innovations in Multi-Agent Systems and Applications-I. Studies in Computational Intelligence*. 2010. Vol. 310. P. 1–27. DOI: 10.1007/978-3-642-14435-6\_1
18. Bui V.-H., Hussain A., Kim H.-M. Q-Learning-Based Operation Strategy for Community Battery Energy Storage System (CBESS) in Microgrid System // *Energies*. 2019. Vol. 12 (9). P. 1789. DOI: 10.3390/en12091789
19. Zhou H., Erol-Kantarci H. Correlated Deep Q-learning based Microgrid Energy Management // 2020 IEEE 25th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD). Pisa, Italy, 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/CAMAD50429.2020.9209254



20. Arwa E.O., Folly K.A. Improved Q-learning for Energy Management in a Grid-tied PV Microgrid // SAIEE Africa Research Journal. 2021. Vol. 112, no. 2. P. 77–88. DOI: 10.23919/SAIEE.2021.9432896
21. Review of Deep Reinforcement Learning and Its Application in Modern Renewable Power System Control / Q. Li, T. Lin, Q. Yu et al. // Energies. 2023. Vol. 16 (10). P. 4143. DOI: 10.3390/en16104143
22. Data Fusion and Situation Awareness for Smart Grid and Power Communication Network Based on Tensor Computing and Deep Reinforcement Learning / Q. Yu, X. Wang, D. Lv et al. // Electronics. 2023. Vol. 12 (12). P. 2606. DOI: 10.3390/electronics12122606
23. Павлов Н.В., Петроченков А.Б. Разработка алгоритма обучения мультиагентной системы управления электротехническим комплексом нефтегазового предприятия с распределенной генерацией // Электротехника. 2022. № 11. С. 11–17.
24. Павлов Н.В., Петроченков А.Б. Разработка мультиагентной системы управления электрическими режимами электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с распределенной генерацией // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2022. № 42. С. 151–177. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.08
25. Интеллектуальные мультиагентные системы в электроэнергетике / А.И. Хальясмаа, С.А. Ерошенко, И.Ф. Юманова и др. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2023. 222 с.
26. ГОСТ Р ИСО 9001–2008. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандратинформ, 2010. 31 с.
27. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B. Multi-agent Approach to Modeling of Electrotechnical Complexes Elements at the Oil and Gas Production Enterprises // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021. P. 1504–1508. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396506

#### References

1. *Federal'nyy zakon ot 23 noyabrya 2009 g. No. 261-FZ. "Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti, i o vnosenii izmeneniy v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii" (s izmeneniyami i dopolneniyami)* [Federal Act of 23 November 2009, No. 261-FA. Energy Conservation and Energy Efficiency Improvement and on Amendments to Selected Legislative Acts of the Russian Federation (as amended and supplemented)]. (In Russ.)
2. Aizhanova G.O. Current state and prospects of development of Russian oil and gas industry. In: *Nauka i obshchestvo: problemy sovremennykh issledovaniy: XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Science and Society: Problems of Co-time Research: XIII International scientific-practical conference]. 2019. Part 3. P. 52–58. (In Russ.)
3. *Politika kompanii v oblasti povysheniya energoeffektivnosti i energosberezheniya No. P2-04.02 P-01. Rosneft'. (s izmeneniyami, utverzhdannymi resheniem Pravleniya PAO "NK "Rosneft'" (protokol zasedaniya ot 30.06.2017 No. Pr-IS-22p), vvedennymi v deystvie prikazom PAO "NK "Rosneft'" ot 28.08.2017 No. 489)* [The company's policy in the field of energy efficiency and conservation No. P2-04.02 P-01. Rosneft. (with changes approved by the decision of the Board of PJSC "NC "Rosneft" (minutes of the session from 30.06.2017 No. Pr-IS-22p), introduced by the order of PJSC "NC "Rosneft" from 28.08.2017 No. 489)]. Moscow: NC "Rosneft"; 2014. 17 p. (In Russ.)
4. *Programma energosberezheniya i povysheniya energeticheskoy effektivnosti OOO "Gazprom dobycha Irkutsk" na 2023–2025 gg.* [The program of energy saving and increase of energy efficiency "Gazprom Mining Irkutsk" LLC for 2023–2025]. (In Russ.) Available at: <https://irkutsk-dobycha.gazprom.ru/d/textpage/61/97/programma-ehh-2023-2025.pdf> (accessed 12.02.2024).
5. *Gazprom. Energosberezhenie i energoeffektivnost'* [Gazprom. Energy saving and energy efficiency]. (In Russ.) Available at: <https://www.gazprom.ru/sustainability/environmental-protection/energy-conservation/> (accessed: 12.02.2024).
6. Matrenin P.V., Arrested A.Y., Antonenko D.V. [Medium-term forecasting of hourly electricity tariffs using ensemble methods]. *Problemy regional'noy energetiki* [Problems of regional energy]. 2022;2(54):26–36. (In Russ.)
7. Lee E., Kim J., Jang D. Load Profile Segmentation for Effective Residential Demand Response Program: Method and Evidence from Korean Pilot Study. *Energies*. 2020;13(6):1348. DOI: 10.3390/en13061348
8. Kanapelko R.A. Russian and foreign practice of interaction between corporate and government structures of the wholesale electricity and capacity market. *Economy and business: theory and practice*. 2019;2:47–51. (In Russ.)
9. Lyakhomskiy A.V., Petrochenkov A.B., Perfil'eva E.N., Romodin A.V., Mishurinskikh S.V. [On assessment of electric consumption of submersible electrical equipment on the financial model]. *Industrial Power Engineering*. 2020;(8):26–33. (In Russ.) DOI: 10.34831/EP.2020.18.90.004

10. Serebryakov N.A. [Selection of optimal architecture and configuration of the neural network in the tasks of short-term forecasting of electricity consumption of the guaranteeing supplier]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya*. 2021;17(2(64)):26–42. (In Russ)
11. Li K., Yang Z., Li D., Xing Y.Y., Nai W. A Short-Term Forecasting Approach for Regional Electricity Power Consumption by Considering Its Co-movement with Economic Indices. In: *2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*. Chongqing, China; 2020. P. 551–555. DOI: 10.1109/ITOEC49072.2020.9141928
12. Klyuev R.V., Morgoeva A.D., Gavrin O.A., Bosikov I.I., Morgoev I.D. Forecasting planned electricity consumption for the united power system using machine learning. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:392–402.
13. Rusina A.G., Filippova T.A., Kalinin A.E., Terlyga N.S. Short-Term Electricity Consumption Forecast in Siberia IPS Using Climate Aspects. In: *19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. Erlagol, Russia, 2018. P. 6403–6407. DOI: 10.1109/EDM.2018.8435002
14. Babich L., Svalov D., Smirnov A., Babich M. Industrial Power Consumption Forecasting Methods Comparison. In: *2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. Yekaterinburg, Russia; 2019. P. 307–309. DOI: 10.1109/USBREIT.2019.8736640
15. Blokhin A.V., Gritsay A.S., Gorshenin A.U. Investigation of factors affecting electricity consumption by a commercial enterprise. *Mathematical structures and modeling*. 2022;3(63):39–47. (In Russ.) DOI: 10.24147/2222-8772.2022.3.39-47
16. Sergeev N., Matrenin P. Improving Accuracy of Machine Learning Based Short-Term Load Forecasting Models with Correlation Analysis and Feature Engineering. In: *2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. Novosibirsk, Russian Federation; 2023. P. 1000–1004. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225058
17. Balaji P.G., Srinivasan D. An Introduction to Multi-Agent Systems. In: *Innovations in Multi-Agent Systems and Applications-I. Studies in Computational Intelligence*. 2010. Vol. 310. P. 1–27. DOI: 10.1007/978-3-642-14435-6\_1
18. Bui V.-H., Hussain A., Kim H.-M. Q-Learning-Based Operation Strategy for Community Battery Energy Storage System (CBESS) in Microgrid System. *Energies*. 2019;12(9):1789. DOI: 10.3390/en12091789
19. Zhou H., Erol-Kantarci H. Correlated Deep Q-learning based Microgrid Energy Management. In: *2020 IEEE 25th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*. Pisa, Italy; 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/CAMAD50429.2020.9209254
20. Arwa E.O., Folly K.A. Improved Q-learning for Energy Management in a Grid-tied PV Microgrid. *SAIEE Africa Research Journal*. 2021;112(2):77–88. DOI: 10.23919/SAIEE.2021.9432896
21. Li Q., Lin T., Yu Q., Du H., Li J., Fu X., Li Q. Review of Deep Reinforcement Learning and Its Application in Modern Renewable Power System Control. *Energies*. 2023;16(10):4143. DOI: 10.3390/en16104143
22. Yu Q., Wang X., Lv D., Qi B., Wei Y., Liu L., Zhang P., Zhu W., Zhang W. Data Fusion and Situation Awareness for Smart Grid and Power Communication Network Based on Tensor Computing and Deep Reinforcement Learning. *Electronics*. 2023;12(12):2606. DOI: 10.3390/electronics12122606
23. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B. Developing a Learning Algorithm for a Multiagent Control System of an Electrical-Engineering Facility for an Oil- and Gas-Production Enterprise with Distributed Generation. *Russian Electrical Engineering*. 2022;93:690–696. DOI: 10.3103/S1068371222110086
24. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B. Development of multiagent control system for electric modes of the electrotechnical complex at oil and gas producing enterprise with microgrid. *Perm national research polytechnic university bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*. 2022;(42):151–177. (In Russ.) DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.08
25. Khalyasmaa A.I., Eroshenko S.A., Yumanova I.F., Stepanova A.I., Matreinin P.V. *Intellektual'nye mul'tiagentnye sistemy v elektroenergetike* [Intelligent multiagent systems in the power industry]. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2023. 222 p. (In Russ.)
26. *GOST R ISO 9001–2008*. [Quality management systems. Requirements]. Moscow: Standartinform Publ.; 2010. 31 p. (In Russ.)
27. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B. Multi-agent Approach to Modeling of Electrotechnical Complexes Elements at the Oil and Gas Production Enterprises. In: *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. St. Petersburg, Moscow, Russia; 2021. P. 1504–1508. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396506

***Информация об авторах***

**Степанова Алина Игоревна**, младший научный сотрудник научной лаборатории цифровых двойников в электроэнергетике, Уральский энергетический институт, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; a.i.stepanova@urfu.ru.

**Хальясмаа Александра Ильмаровна**, канд. техн. наук, доц., заведующий научной лабораторией цифровых двойников в электроэнергетике, Уральский энергетический институт, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; a.i.khaliasmaa@urfu.ru.

**Матренин Павел Викторович**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник кафедры электротехники, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; p.v.matrenin@urfu.ru.

***Information about the authors***

**Alina I. Stepanova**, Junior Researcher of the Scientific Laboratory of Digital Twins in the Electric Power Industry, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; a.i.stepanova@urfu.ru.

**Alexandra I. Khalyasmaa**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Scientific Laboratory of Digital Twins in the Electric Power Industry, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; a.i.khaliasmaa@urfu.ru.

**Pavel V. Matrenin**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Electrical Engineering Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; p.v.matrenin@urfu.ru.

*Статья поступила в редакцию 21.03.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 13.05.2024.*

*The article was submitted 21.03.2024; approved after review 13.05.2024; accepted for publication 13.05.2024.*